第 38 卷第 4 期
2018 年 2 月

生 态 学 报
ACTA ECOLOGICA SINICA

Vol.38, No.4
Feb., 2018

DOI: 10.5846/stxb201707111248
陆咏晴,严岩,丁丁,赵春黎,宋杨,赵景柱.我国极端干旱天气变化趋势及其对城市水资源压力的影响.生态学报,2018,38(4):1470-1477.
Lu Y Q, Yan Y, Ding D, Zhao C L, Song Y, Zhao J Z.Drought trends and their impacts of pressures of urban water resources in China of precipitations. Acta Ecologica Sinica,2018,38(4):1470-1477.

我国极端干旱天气变化趋势及其对城市水资源压力的影响

陆咏晴[1,2],严 岩[1,*],丁 丁[3],赵春黎[1],宋 扬[1],赵景柱[1,4]

1 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室,北京 100085

2 中国科学院大学,北京 100049

3 北京大学,北京 100871

4 中国科学院城市环境研究所,厦门 361021

摘要:随着全球气候变化和水循环的改变,降水不均和持续干旱等极端天气事件的频度和强度增加,对水资源,尤其是人口和社会经济密度高的城市的水资源带来很大的影响和压力。为了探究我国干旱天气的变化趋势、区域特征、及其对城市水资源压力的影响,采用全国 917 个气象站点 1951—2014 年的逐日降水量数据集,分析了我国水资源及干旱的变化趋势和空间分布特征,并以我国 289 个主要地级市为研究对象,构建了气候变化情境下的城市基于区域降水禀赋的水资源压力评估方法,预测并展望了不同时段和不同代表性浓度路径(RCPs)情景下的未来城市水资源压力的情况。结果显示,我国极端干旱情况整体是随着全球气候变化增加的,年最长连续无降水天数变化速度的平均值为 2.3d/100a,但是具有区域性,具体表现为南部地区干旱减缓而北部地区干旱严重。我国城市水资源压力受水资源禀赋的影响,呈现北方高而南方低的分布,除此之外水资源消耗大的大城市资源压力也比较大。随着气候变化,近期我国整体城市水资源压力相对现阶段增加了 2%左右,具体水资源压力上升的城市有 170 个,水资源压力减少的城市有 110 个,剩下的 9 个城市水资源压力受气候变化的影响比较小。在低应对的 RCP8.5 情景下的城市水资源压力远远高于在 RCP2.6 情景,这说明减缓气候变化工作对降低我国城市水资源压力有积极作用;城市水资源压力的变化并不是均匀的,呈现南部减少而北部增加的变化趋势,我国华北地区城市的水资源压力最大,随着气候的变化,该地区的水资源压力也在随着时间不断增加,需要政府积极行动,提出有针对性和前瞻性的水资源规划方案,并依据方案采取措施,以应对气候变化造成的城市干旱增加。

关键词:干旱;气候变化;水资源压力;城市

Drought trends and their impacts of pressures of urban water resources in China of precipitations

LU Yongqing[1,2], YAN Yan[1,*], DING Ding[3], ZHAO Chunli[1], SONG Yang[1], ZHAO Jingzhu[1,4]

1 *State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100085, *China*

2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*

3 *Peking University, Beijing* 100871, *China*

4 *Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Science, Xiamen* 361021, *China*

Abstract: Regional variability of precipitation and droughts has been increasing as global climate change has progressed, which has aggravated regional shortages of water resources, particularly in cities because of their high population density and

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0502102);国家应对气候变化专项经费项目(201624)

收稿日期:2017-07-11; **网络出版日期:**2018-01-04

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: yyan@rcees.ac.cn

human activities. To investigate the water resources of 289 primary local cities in China and the influence of climate change, we scaled changes in drought occurrences based on precipitation data of 917 meteorological stations during 1951—2014, and constructed a method to evaluate pressures on urban water resources by regional precipitation, and we also forecast the pressures influenced by climate change in short or longer terms of different RCPs. The results show that because of global climate change, drought conditions are mainly increasing in prevalence in China, longest annual continuous no precipitation days are increasing by 2.3days/100a. However, these increases are not identical everywhere. In some areas of southern China, drought conditions have even improved, although conditions have become more severe in western and northern China. Pressures on water resources are greater in northern cities than in the south, because precipitation declines from the coast inland. Pressures on water resources are greater in metropolises than in other places because of the great quantities of water consumed by urban inhabitants and active economic activities. These pressures will increase about 2% after 20 years later relatively to present situations of climate change, and concretely there are 170 local cities in China whose pressures are greater while 110 cities are decreasing and only 9 cities which are insensitive of climate change of precipitations. Pressures are much heavier under RCP8.5 than under RCP2.6 because RCP8.5 represents much faster climate change. Therefore, mitigation of climate change is beneficial to sustaining the water supplies of cities in China. Water resources in North China are projected to decline in the future with global climate change because of reduced precipitation and high consumption. Governments should focus on cities in such areas to adopt prospective policies and formulate plans and implements to ensure that the water supply does not limit economic development.

Key Words: urban; climate change; water resources pressure; drought

全球气候变化对全球和区域尺度水循环具有重要影响。降水的时空不均匀性加强,使部分地区干旱情况加重[1-2]。我国人口众多,水污染严重,人均水资源占有量小于 2500m^3,是世界平均水平的 1/4,是一个相对干旱的国家[3-4]。相对于农村来说,城市由于经济活动和人口密集,受灾之后产生的损失会被放大[5-6],干旱造成河水流量下降、地下水位下降,沿海地区城市还会出现咸水倒灌、影响供水[7-9], 城市干旱降低了消防能力,引发用水冲突,造成个人卫生和环境卫生恶化,增加传染病暴发危险性,同时也会导致城市电力短缺;直接影响城市居民的生产生活和身体健康[10-11]。据统计,1991 年到 2009 年之间,我国共发生 8 次特大干旱,干旱区域不断扩展,影响范围也随之扩大,从农村扩展到城市,损失越加严重[12],2009 年是我国干旱情况比较严重的年份,全国 89 座城市面临供水紧张,受灾人口高达 1670 万人[5]。随着我国经济的发展和城市化进程,城市用水矛盾越加尖锐,再加上全球气候变化,部分城市的干旱在不断加剧,城市在保证水资源供应方面面临新的挑战,关注我国在气候变化情境下的区域干旱情况和城市水资源压力有利于城市制定更加合理的水资源利用策略[13-15]。

国内外学者对水资源压力指数已有很多研究,最早将人均水资源量定义为水资源压力指数,后来又建立了水资源的供需压力指数,旨在能从区域的用水模式探求实际缺水程度,后又考虑水质和水安全,建立了新的水资源安全评价指数[16-20],上述水资源压力评价指标的建立有利于从多方面考虑区域的水资源压力,以更加准确的评估区域的干旱水平,从而为区域水资源规划提供更准确的依据和支撑。本文关注气候变化对城市水资源压力的影响,使用区域降水量来计算水资源压力,比较各区域城市的水资源压力的相对差异,为国家有侧重地缓解各区域城市的水资源压力做出研究支撑。虽然城市部分用水是使用河流水等过境水,城市的过境水的量与城市本身的气候条件、地质状况、地貌类型、流域分界、所处区位等有很大的关系,要梳理好这些影响因子的相互作用过程、精确衡量城市过境水的数量有很高的数据要求和技术难度。且从整体来说,我国降水丰富的地区,河网密布,城市可用水资源也比较多,而干旱地区降水比较少,河流密度低,城市可用水资源匮乏,所以以降水量来衡量区域的水资源禀赋简化了水资源收支平衡的空间尺度,降低了数据要求,是对城市水资源禀赋的合理抽象。

1 研究数据和方法

1.1 研究数据

本文使用的数据包括气象数据和城市统计数据，气象数据为我国气象数据中心提供的 917 个站点从 1951 年到 2014 年逐日降水量数据集，将该数据集进行筛选，选择超过 40 年，每年缺失数据少于 3 个月的数据。本文研究的城市为我国 289 个主要地级城市，使用城市统计数据包括《中国城市统计年鉴 2014 年》中城市供水总量、城市市辖区面积等。

1.2 研究方法

1.2.1 相关气象因子

干旱是指长时期内无降雨或者降雨量少，使水资源短缺，导致经济损失甚至威胁人身安全的现象[21]，使用年总降水总量和年最长连续无降水天数来表现该地区的水资源情况和干旱情况[22]，年总降水量是区域内降水的水平，反映了该地区在未受人为活动影响的条件下的干旱情况；年最长连续无降水天数则是反映了城市的极端干旱水平。

1.2.2 年最长连续无降水天数相对变化率

采用一元线性回归分析来计算气候变化背景下年最长连续无降水天数的变化速度（公式 1—3），计算得出的 b，可以表示区域内极端干旱情况受气候变化影响的方向和变化速度。根据年最长连续无降水天数变化速度和年最长连续无降水天数平均值计算出的年最长连续无降水天数的相对变化率（公式 4），可以反映气候变化对区域极端干旱天气的影响对于该区域正常干旱水平的相对强度。

$$d = a + bx \tag{1}$$

其中：

$$b = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(d_i - \bar{d})}{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2} \tag{2}$$

$$a = \bar{d} - b\bar{x} \tag{3}$$

d：年最长连续无降水天数（d）；d_i：第 i 年的最长连续无降水天数；x：年份；x_i：第 i 年；b：年最长连续无降水天数变化速度（d/a）；a：回归公式截距。

$$t = \frac{b}{\bar{d}} \tag{4}$$

t：年最长无降水天数相对变化率；b：年最长连续无降水天数变化速度（d/a）；$\bar{d}$：年最长连续无降水天数平均值（d）。

1.2.3 反距离插值分析法

文本采用反距离插值法获得区域气象因子空间分布情况。反距离插值分析法是空间插值的一种，该方法基于地理学第一定律，本文以插值点与样本点之间反距离的 2 次幂为权重进行加权平均。

1.2.4 城市水资源压力评估与展望

（1）基于降水禀赋的城市水资源压力指数

城市的水资源来源主要包括地下水和河流水源两种，无论是地上水还是地下水都来自于该地区的降水，降水量比较大的地区，河网密度和地下水量都比较多；而降水量比较少的地区，河流流量与地下水储藏量都比较少，所以一个地区的降水在一定程度上能够反映该地区的水资源禀赋[23]。城市实际可用水资源的影响因素错综复杂，例如区域降水与水循环过程、流域上下游关系、季节变化等。为了更清楚地反映气候变化对城市水资源的影响，本文直接采用城市的降水量来衡量城市的水资源禀赋，不考虑河流等其他水源对城市用水的支持作用。根据各城市的年降水量与《中国城市统计年鉴 2014 年》中城市的总供水量数据和城市市辖区面

积计算出城市水资源压力指数(公式5),可以在一定程度上反映该城市常年水资源压力。

$$P_1 = \frac{Q}{R \times A} \tag{5}$$

其中 P_1:基于降水禀赋的城市水资源压力指数;Q:城市总供水量(万 m^3);R:总降水量(mm);A:城市市辖区面积(km^2)。

(2)极端干旱情况下城市水资源压力指数

除了考虑区域降水对水资源压力造成的影响之外,降水时间上的不均匀性也是水资源压力的重要影响因素,若是这个地区的降水从时间上来讲是绝对均匀的,则该地区每日都有降水,水资源压力则在原本的基础上没有增加。若是该地区的降水集中,其旱期远远超过我国平均水平,则会给水资源压力带来很大的改变,连续干旱天气发生时,越到后期,这种干旱增加越严重,带来的城市的经济和居民健康损失越大,与其他常用数学关系相比,指数关系更适合描述这种连续干旱对城市水资源的影响。考虑到连续干旱天气对水资源压力的影响,本文对城市水资源压力进行修正(公式6);其中 d_{city} 为本文研究的城市平均年最长连续无降水天数的样本均值,使用 d_{city} 对城市年最长连续无降水天数进行标准化,以保证修后城市水资源压力数量级方面的合理性。

$$P_2 = P_1 \times e^{\frac{\bar{d}}{d_{city}}} \tag{6}$$

其中 P_2:极端干旱情况下城市水资源压力指数;P_1:基于降水禀赋的城市水资源压力指数; $\bar{d}$:城市近60年来年最长连续无降水天数平均值(d);d_{city}:所有城市平均年最长连续无降水天数的样本均值。

(3)气候变化影响下的城市水资源压力指数评估与展望

除了考虑现在的气候情况之外,未来的气候变化情况城市水资源压力的影响也不容忽视,在气候变化的影响下,未来城市面临的水资源压力将有所改变。可使用($1+n \times t_s$)对未来极端干旱天气水平进行修正(公式7)。

本文预测和展望了我国城市近期及远期两个时间段的城市水资源压力,其中使用20年代表近期时段,50年代表远期时段,由于气候变化趋势具有连续性,本文认为近期的极端干旱天气变化速度无明显改变。远期的气候变化速度因为受人为影响,有比较大的不确定性,为了展望在不同情景下的城市排水压力,本文引入了IPCC 提出的代表性浓度路径(Representative Concentration Pathways RCPs)情景,其中最有代表性是低应对的RCP8.5 和高应对 RCP2.6 情景模式,在 RCP8.5 情景下,平均气温上升速度为 6.59℃/100a,而在 RCP2.6 情景下,平均气温上升速度为 1.06℃/100a[24]。与过去 100 年全球平均气温上升速度为 0.68℃/100a 对比[25],假设未来我国各地区极端干旱天气的变化方向与现阶段一致,但由于全球气候变化速度有所加快,我国各地区的极端干旱天气的变化速度也产生相应的变化,以气温上升速度作为全球气候变化程度的量化方式,则在RCP8.5 情景下年最长连续无降水天数相对变化率 $t_{8.5}$ 为过去60多年的年最长连续无降水天数相对变化率 t 的9.68倍。在 RCP2.6 情景下年最长连续无降水天数相对变化率 $t_{2.6}$ 为过去60多年的年最长连续无降水天数相对变化率 t 的1.56倍。

$$P_s = P_1 \times e^{\frac{\bar{d} \times (1+nt_s)}{d_{city}}} \tag{7}$$

其中 P_s:未来城市水资源压力指数(P_3:近期城市水资源压力指数、$P_{8.5}$:RCP8.5 情景下远期城市水资源压力指数、$P_{2.6}$:RCP2.6 情景下远期城市水资源压力指数);P_1:基于降水禀赋的城市水资源压力指数; $\bar{d}$:城市年最长连续无降水天数平均值(d);t_s:年最长连续无降水天数相对变化率(近期 $t_s=t$(公式4);远期 $t_s = t_{8.5}$ 或 $t_{2.6}$);d_{city} 为本文研究的地级市平均年最长连续无降水天数的样本均值;n:预测时间与基准时间的年份差(a)。

(4)城市水资源压力分级

为了表现城市之间水资源压力的相对差异,将各种情况下的城市水资源压力指数等分为10个等级,并使用连续色阶绘制空间分布图,以便能反映出水资源压力的区域分布规律。

2 结果与分析

2.1 我国年降水及干旱分布和变化趋势

如图 1 所示,我国年降水量西北低而东南高,呈现明显的阶梯分布。我国年最长连续无降水天数分布与降水分布相反,整体上呈现东低西高的分布格局,其中高纬度地区和长江流域地区的降水比较均匀,年最长无降水天数最低,我国南部沿海虽然降水丰富,但是雨季和旱季明显,降水相对集中,反倒容易遭受干旱天气的影响。年最长连续无降水天数最大的地区集中在我国西北地区和青藏高原,其次为河北和四川盆地。我国干旱情况总体是增加的,年最长连续无降水天数变化速度的平均值为 2.3d/100a,但是全国干旱变化并不均匀,基本为南部缓解而北部严重。其中年最长连续无降水天数上升速度最大的地区主要集中在青藏高原南部,其他干旱增加的区域还包括广东、京津冀、山东等地区。干旱缓解的地区主要集中在四川盆地,年最长连续无降水天数下降趋势最明显,其他干旱下降的区域包括长江下游、东北和新疆地区。与年最长连续无降水天数变化速度分布类似,我国年最长连续无降水天数相对变化率总体上也呈南低北高分布,华南地区除广东省极端

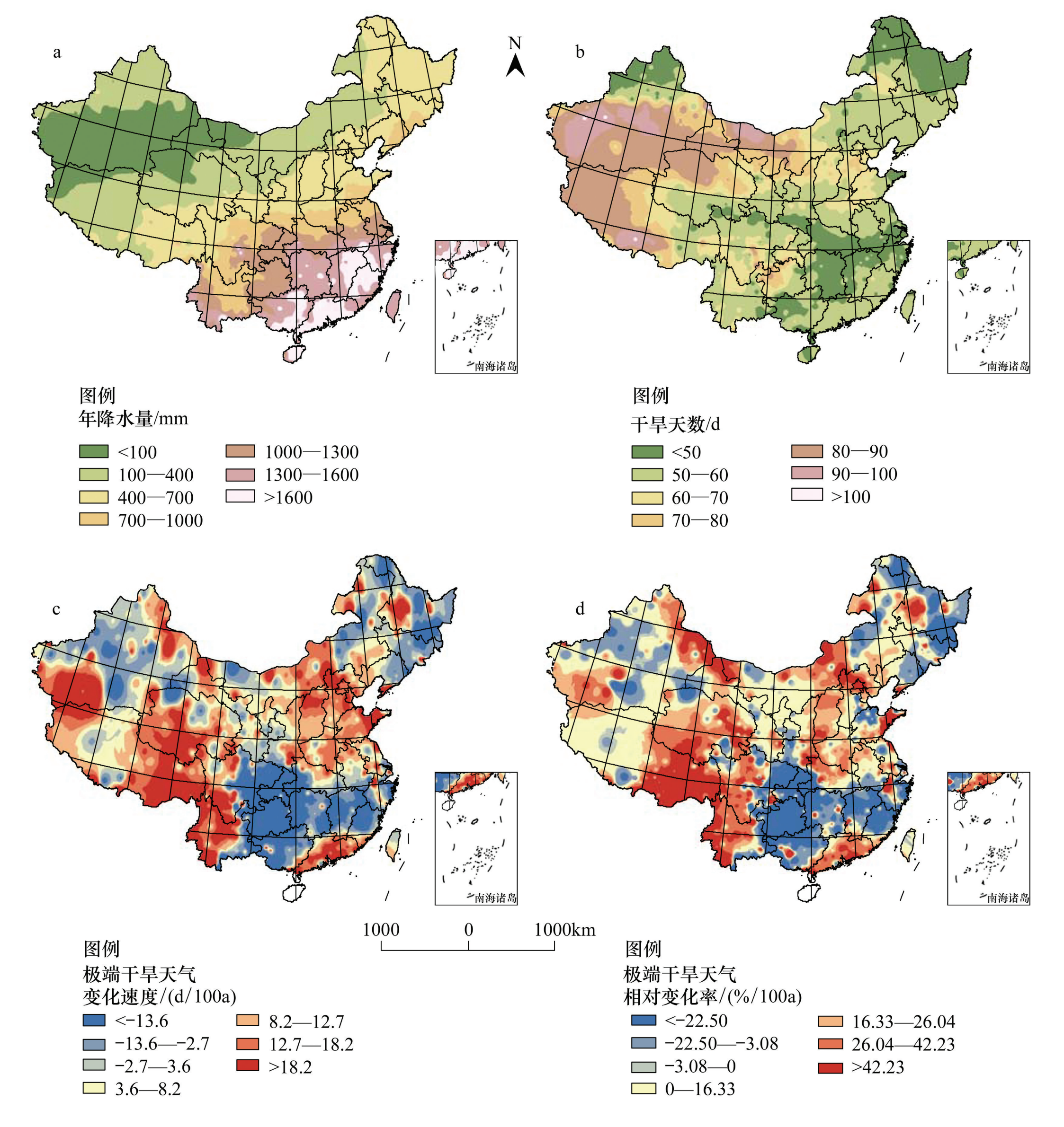


图 1 我国 1951—2014 极端干旱情况及变化趋势图

Fig.1 Extreme drought weather and it′s change in China during 1951—2014

(a)平均年降水量分布图;(b)平均年最长连续无降水天数分布图;(c)极端干旱天气变化速度分布图;(d)极端干旱天气相对变化率

干旱天气随着气候变化有明显上升之外,其他地区的极端干旱天气降低明显,北方地区除东北和西北极端干旱天气随着气候变化明显减缓之外,其他地区都属于年最长连续无降水天数相对变化率较高的区域。其中增加率最大的地区主要集中在青藏高原南部,说明气候变化对该区域的影响力度比较大。降低率最大的区域主要集中在我国长江流域,说明气候变化对该区域连续干旱天气的减缓力度最大。

2.2　我国城市水资源压力

根据图 2,我国城市基于降雨禀赋的水资源压力(P_1)总体上呈南低北高的特点,水资源压力最大的城市主要集中在我国华北平原以及东部沿海。在考虑极端干旱天气之后的水资源压力(P_2)比较大的城市主要集中在我国西北内陆地区,其南低北高的分布更加明显,这是由于整体上来说我国降水量大的地区,降水发生的概率大,城市的连续无降水天数也比较短,反之西部地区城市降水量低,城市的无降水天数也比较长,城市在

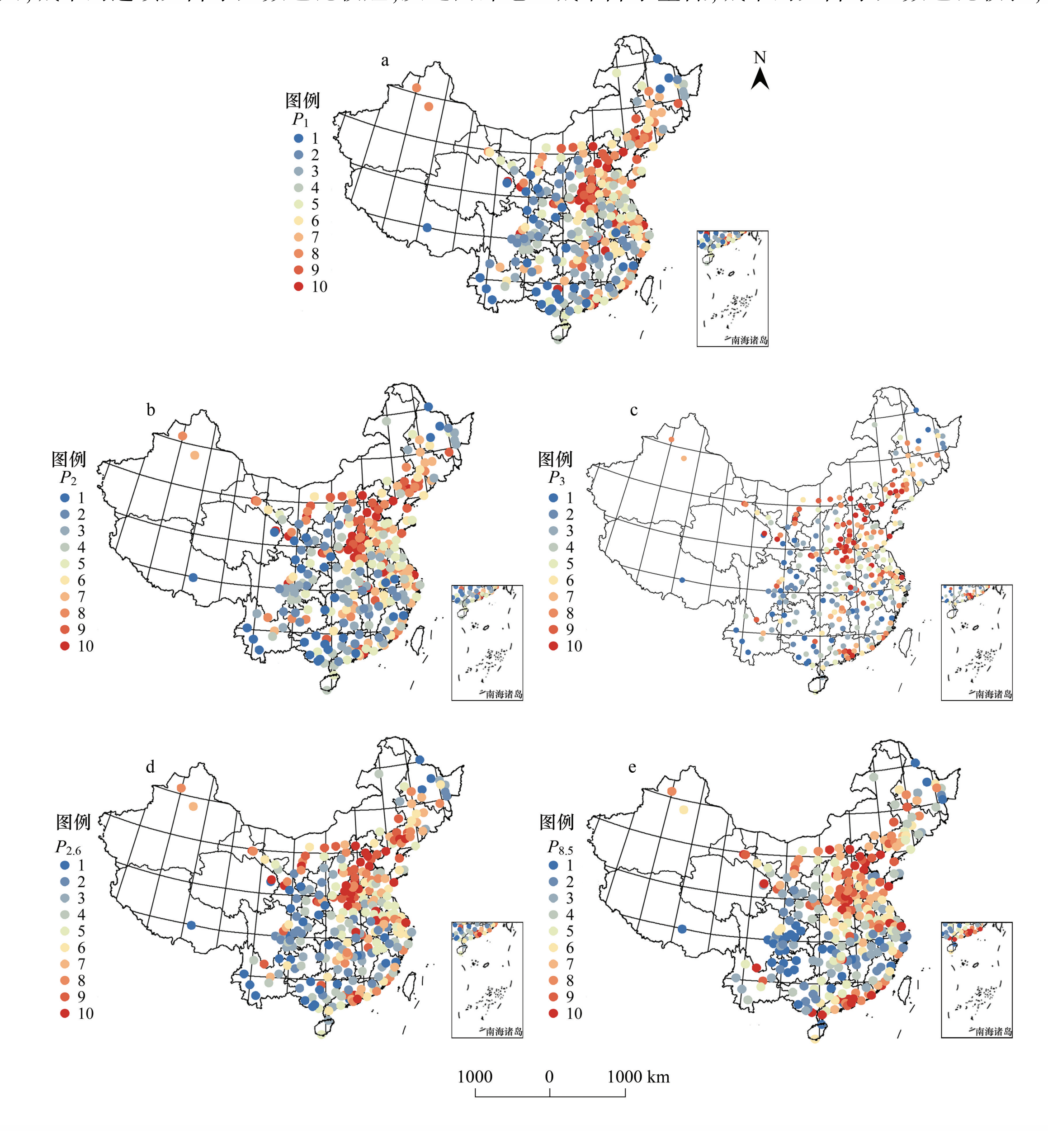


图 2　我国城市水资源压力图

Fig.2　Pressures on urban water resources of China

(a)基于降水禀赋的城市水资源压力;(b)极端干旱情况下城市水资源压力指数;(c)近期城市水资源压力指数(d)RCP2.6 情景下城市远期城市水资源压力指数 (e) RCP8.5 情景下城市远期城市水资源压力指数

干旱发生时的水资源压力也比较大。除此之外,四川盆地和云南部分地区城市两者之间的差别比较大,这些地区降水有明显的旱季和雨季之分,降水时期比较集中,容易出现长期的无降水天气,导致城市的水资源压力等级升高。

受气候变化影响,未来 20 年城市水资源压力(P_3)与 P_2 相对增加了 2%,具体共有 170 个城市水资源压力随着气候变化有所上升,110 个城市有所缓解,剩下的 9 个城市的水资源压力随着气候变化并无比较大的变化。虽然未来我国整体的水资源压力有所增加,但是整体分布规律与现阶段城市水资源压力(P_2)相比并无很大的差别;由于我国极端干旱天气呈现南部减少,北部增加的分布规律,华南地区的极端干旱天气呈现降低趋势,城市的干旱有所减缓,特别是降低了四川盆地城市的水资源压力。而华北地区的城市原本就降水少,再加上气候变化造成降水集中,城市的水资源压力随着时间增加,更加重了未来城市的干旱。我国广东省、云南西部和西藏南部地区的降水丰富,除了大城市由于较高的用水量造成城市水资源压力比较大之外,其他城市的水资源压力比较小,但是随着气候变化,这些地区的降水不均匀程度增加,增加了城市的干旱,特别是原本需水量大的大城市,也会面临着越来越严重的城市干旱。

在 RCP2.6 情景下,由于全球减缓气候变化工作的努力,相比其他 RCPs 情景,气候变化速度有所减缓,但是未来极端干旱情况仍比现阶段严重,在此情景下未来 50 年后城市水资源压力($P_{2.6}$)相对现阶段城市水资源压力(P_2)增加了 10%,尤其是华北地区和广东等地,该地区的极端干旱天气增速比较快,未来城市的水资源压力更大,特别是用水量比较大的大城市面临更为严重的水资源问题。在 IPCC 提出的几个未来气候情景中,RCP8.5 情景是全球气候变化最严重的一个情景模式,气候变化速度相对于现在有很大的上升空间,气候变化速度显著高于 RCP2.6 情景和现在的气候变化水平,与 RCP2.6 模式相比,我国城市整体水资源压力将更大,但显著增加的区域仍集中在华北和广东,与此相对,我国华南大部分地区极端干旱天气的减缓程度更大,城市水资源压力得到很大程度的缓解。

3 结论与建议

本文研究表明,总体上我国北部的极端干旱随着气候变化呈现增加趋势,而南方则相反。虽然我国区域水资源禀赋呈东南高而西北低的阶梯状分布情况,西北城市的水资源比较少,但是由于西部城市的用水并不多,且地级城市密度低,我国水资源压力大的城市反而集中于华北。除了降水禀赋导致水资源压力较大外,由于城市本身发展造成的水资源供应紧张也对城市水资源压力造成明显的影响,具体表现为大城市的水资源压力等级明显高于周围其他城市。在考虑极端干旱天气情况下,城市水资源压力随着干旱时间呈指数状增加,我国南低北高的城市水资源压力分布更加明显,除此之外四川盆地和云南等地由于降水发生的时间比较集中,虽然地处湿润地带,但该区域城市水资源压力比较大。

随着气候变化 20 年后我国城市水资源压力整体上高于现有水平,特别是我国原本水资源压力就很大的华北地区和广东地区。在 RCP2.6 情景下,未来 50 年后,我国城市水资源压力分布与现状分布相似,但是整体上高于 20 年之后的城市水资源压力,特别是华北地区和广东地区增加比较明显,华南地区水资源压力在气候变化的影响下有所缓解。在 RCP8.5 情景下,全球气候变化趋势更加明显,我国整体水资源压力增加更为迅速,华北和广东地区的城市水资源压力依然增加最明显,特别是原本水资源禀赋比较好的广东地区城市将成为水资源压力最大的区域之一。对于极端干旱天气随着气候变化有显著增加趋势的地区,应该重视城市水资源危机和气候变化对城市供水的危害性,积极采取措施,保障城市正常的供水能力,并根据各区域城市的发展情况和气候变化的相对水平,提出前瞻性和有针对性的对策。

参考文献(References):

[1] IPCC. Working Group I Contribution to the IPCC fifth assessment report, climate change 2013: The physical science basis: Summary for policymakers[R/OL].[2013-10-28]. http://www.climatechange2013. org/images/uploads/WGIAR5-SPM_Approved27Sep2013.pdf.

[2] Trenberth K E. Atmosphere moisture residence times and cycling: implications for rainfall rates with climate change. Climate Change, 1998, 39

(4): 667-694.
[3] 刘普. 中国水资源市场化制度研究[D].武汉大学,2010.
[4] 柴方营. 中国水资源产权配置与管理研究[D].东北农业大学,2006.
[5] 陈鹏,邱新法,曾燕. 城市干旱风险评估. 生态经济,2010,07:158-161.
[6] 胡晓梅,钟琦. 城市气象灾害监测的现状与发展探析. 河北工程大学学报(社会科学版),2009,03:17-18.
[7] 许凯. 我国干旱变化规律及典型引黄灌区干旱预报方法研究[D].清华大学,2015.
[8] 王丽亚,郭海朋. 连续干旱对北京平原区地下水的影响. 水文地质工程地质,2015,(01):1-6.
[9] 姜晨光,姜平,蔡伟,崔专. 城市地下水位变化与地面沉降关系的监测与分析. 地下水,2003,03:133-135+159.
[10] 吴玉成,吕娟,屈艳萍. 城市干旱及干旱指标初探. 中国防汛抗旱,2010,(02):35-37.
[11] 闫攀,车伍,赵杨,李俊奇,王思思. 绿色雨水基础设施构建城市良性水文循环. 风景园林,2013,02:32-37.
[12] 喻忠磊,杨新军,石育中. 关中地区城市干旱脆弱性评价. 资源科学,2012,34(03):581-588.
[13] 谈建国,侯依玲,田展. 城市可持续发展的气候风险与多元应变举措. 上海城市管理,2012,03:27-31.
[14] 张建云, 王国庆, 刘九夫, 贺瑞敏. 国内外关于气候变化对水的影响的研究进展. 人民长江, 2009, 40(8): 39-41.
[15] 李峰平,章光新,董李勤. 气候变化对水循环与水资源的影响研究综述. 地理科学,2013,(04):457-464.
[16] 韩宇平,阮本清.中国区域发展的水资源压力及空间分布.四川师范学院学报:自然科学版, 2002(3): 119-224.
[17] Falkfmarkm. The massive water scarcity now threatening Africa: Why isn't it being addressed. Ambio, 1989(2): 112-118.
[18] Downs T, Mazari-Hiriart M. Sustainability of least cost policies for meeting Mexico City's future water demand. Water Resources Research, 2000,36(8): 2321-2339.
[19] 贾绍凤, 张军岩, 张士锋.区域水资源压力指数与水资源安全评价指标体系.地理科学进展, 2002(6):538-545.
[20] 吴佩林.我国区域发展的水资源压力分析. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2005,33(10):143-149.
[21] 张景书. 干旱的定义及其逻辑分析. 干旱地区农业研究,1993,(03):97-100.
[22] Justino F, Mélo A S D, Setzer A, Sismanoglu R, Sediyama G C, Ribeiro G A, Machado J P, Sterl A. Greenhouse gas induced changes in the fire risk in Brazil in ECHAM5/MPI-OM coupled climate model. Climatic Change, 2011, 106(2):285-302.
[23] 韩晓刚. 城市水源水质风险评价及应急处理方法研究[D].西安建筑科技大学,2011.
[24] 段青云,夏军,缪驰远,孙巧红. 全球气候模式中气候变化预测预估的不确定性. 自然杂志,2016,(03):182-188.
[25] 马亚维,任哲,王英俊. 近百余年来全球气温长期变化趋势分析. 山东气象,2014,(01):21-24.

